

# GPS 预报星历和钟差的精度及对标准定位服务的影响\*

王爱生 王 飞

(江苏师范大学测绘学院,徐州 221116)

**摘 要** 利用 IGS 的数据和产品分析了 1995—2010 年的预报星历的精度、预报钟差的精度和标准单点定位的精度,结果显示,所有的精度都有逐渐提高的趋势:广播星历的精度(SISRE)小于 2 m,钟差的预报精度为 $(6 \sim 20) \times 10^{-9}$  s,标准定位的平面精度为 1.0~7.0 m,高程精度为 2.5~27.0 m。

**关键词** GPS;实时服务;广播星历;钟差;标准定位服务

中图分类号:P227

文献标识码:A

## ON GPS FORECASTING EPHEMERIS AND CLOCK CORRECTION ACCURACY AND EFFECTS ON STANDARD POINT POSITIONING

Wang Aisheng and Wang Fei

(School of Geodesy and Geomatic, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116)

**Abstract** Using IGS data and products the forecasted ephemeris accuracy and the forecasted clock correction accuracy as well as the standard single point positioning accuracy during 1995 to 2010 is analyzed. These analyses show that all the accuracy trend to increase gradually, such as the forecast ephemeris accuracy (SISRE) is below 2 m, and the predicted clock correction accuracy is  $(6 \sim 20) \times 10^{-9}$  s, the standard positioning accuracy is 1.0~7.0 m in the horizontal and 2.5~27.0 m in the vertical.

**Key words:** GPS; real-time serve; broadcast ephemeris; clock correction; SPS(Standard Point Positioning Serve)

### 1 引言

GPS 提供的实时服务包括标准定位服务和精密定位服务。GPS 实时用户的误差由两部分组成:空间信号(SIS)误差和用户设备(UE)误差。空间信号测距误差(SISRE)是对 GPS 卫星播发的导航电文的精度的一个度量,包含星历和卫星钟误差,用户设备测距误差(UERE)完全依赖于接收机的设计和它所处的环境。因为 IGS 给出的精密星历提供的卫星位置精度已优于 5 cm,因此,用广播星历计算的卫星位置与相应时刻的精密星历进行比较,可反映广播

星历的精度。Warren 等<sup>[1]</sup>对 1993—2002 年的卫星星历进行了分析,计算出的 SISRE 不超过 2.5 m。郭裴等<sup>[2]</sup>分析了 2007 年 10~28 天的卫星星历,其径向、法向和切向方向的偏差分别小于 0.8、2 和 2 m。余鹏等<sup>[3]</sup>分析了 2002 年 7 月 11—15 日 6 个卫星的星历精度,得到线性精度为几米到十几米。对 GLONASS 卫星也可以采用同样的方法<sup>[4]</sup>。IGS 精密星历中提供的卫星钟钟差精度优于  $0.1 \times 10^{-9}$  s,因此使用导航电文中的钟差参数计算的钟差与相应时刻的钟差比较可反映导航电文中卫星钟差的精度。郭裴等<sup>[2]</sup>的分析表明铷钟的 RMS 为 $(3 \sim 5) \times$

\* 收稿日期:2012-04-12

基金项目:国家自然科学基金(41174032);江苏师范大学科研基金(09XLR18)

作者简介:王爱生,教授,主要从事空间大地测量与地球动力学的研究. E-mail: wangaisheng58@sohu.com

$10^{-9}$  s,而铯钟的 RMS 为  $1 \sim 2 \times 10^{-9}$  s。卫星星历和钟差的精度对单点定位最为敏感,IGS 提供了所有的 IGS 站点的精确 ITRF 坐标,精度可达 2 mm,因此,实时单点定位的结果与精确 ITRF 坐标进行比较可反映星历和钟差的总体精度。文献[5,6]曾对标准单点定位的精度做过研究,但因为定位误差中除了包含 SISRE 之外,还包含 UERE,因此,这种比较只能在一定程度上反映广播星历和钟差的精度。

本文按照上述思路在 SOPAC<sup>[7]</sup> 上搜集了 1995—2010 年的数据,统计了预报星历、预报钟差以及单点定位的精度,得到的结论有利于对 GPS 的精度进行比较客观的了解。

## 2 卫星位置精度统计

GPS 广播星历使用的是 WGS84 系统,而 IGS 精密星历使用的是 ITRF 参考框架,但两者实际差异极小<sup>[2,8]</sup>,计算时不予考虑。由于广播星历与 IGS 精密星历的参考点不同,本文使用来自 CODE 的卫星信息文件<sup>[9]</sup>中的天线相位偏心数据进行改正。地球坐标与惯性坐标转换时使用的地球定向数据来自 IERS 公布的 BULLET A 文件<sup>[10]</sup>,而格林尼治视恒星时 GAST 使用 IAU2000 公约推荐的公式<sup>[11]</sup>。

表 1 是用于统计计算的日期、时间和卫星号。每年选取 5 个卫星,每个卫星只考察一个历元,首先

算出在惯性空间三维直角坐标系的偏差  $dX$ 、 $dY$ 、 $dZ$ ,并通过坐标系的旋转<sup>[12]</sup>转换为在轨道径向、切向和法向的偏差  $dR$ 、 $dA$ 、 $dC$ ,然后统计径向、切向和法向的精度  $R$ 、 $A$ 、 $C$ ,最后计算不包含钟差的 SISRE<sup>[1]</sup>。表 2 显示了对 2010 年 5 个卫星偏差及 SISRE 的计算过程和结果,图 1 是对历年的 SISRE 的汇总。从图 1 可以看出,1995—2010 年,SISRE 有震荡减小的趋势,最大为 1.9 m,最小为 0.8 m。所以认为当前卫星预报的精度指标 SISRE 小于 2 m 是恰当的。

表 1 分析卫星位置精度时使用的数据

Tab.1 Data for satellite position accuracy analysis

年-月-日	日期		时间		卫星号 PRN
	年积日	GPS 周	周积日(时:分:秒)		
1995-05-23	143	803	2	2:00:00	17 24 25 26 23
1996-05-22	143	854	3	2:00:00	05 16 06 17 23
1997-05-23	143	906	5	2:00:00	17 26 23 21 09
1998-05-23	143	958	6	2:00:00	26 03 17 21 22
1999-05-23	143	1011	0	2:00:00	26 03 21 27 31
2000-05-22	143	1063	1	2:00:00	03 09 15 17 21
2001-05-23	143	1115	3	2:00:00	09 11 14 21 23
2002-05-23	143	1167	4	0:00:00	01 02 03 04 05
2003-05-23	143	1219	5	2:00:00	05 07 11 14 20
2004-05-22	143	1271	6	2:00:00	05 07 11 14 20
2005-05-23	143	1324	1	2:00:00	01 04 11 20 23
2006-05-23	143	1376	2	0:00:00	25 20 11 17 30
2007-05-23	143	1428	3	0:00:00	23 11 04 12 20
2008-05-22	143	1480	4	0:00:00	20 31 16 04 13
2009-05-23	143	1532	6	12:00:00	13 29 02 31 04
2010-05-23	143	1585	0	2:00:00	13 21 03 08 06

表 2 SISRE 计算过程(单位:m)

Tab.2 Calculation process of SISRE(unit:m)

历元	卫星号	惯性坐标轴方向			径向切向法向			统计结果
		$dX$	$dY$	$dZ$	$dR$	$dA$	$dC$	
2010	13	2.076	-0.523	0.065	-1.757	1.211	-0.182	$R = 1.265$ $A = 1.499$ $C = 0.374$ $SISRE = 1.284$
	21	-1.657	0.059	-0.203	-1.497	-0.262	0.694	
	3	1.469	0.609	-1.160	-0.929	1.702	0.339	
	8	-0.821	-1.868	-1.916	-0.987	2.606	-0.263	
	6	-0.453	0.616	-0.520	-0.916	-0.122	-0.042	

## 3 卫星钟差的精度统计

表 3 考察的是日期、计算历元和卫星。每一年只考察 5 个卫星,每个卫星只计算一个时刻上的钟差,表 4 中显示的是 2010 年钟偏差和均方根误差的计算过程和结果。图 2 是历年的钟误差统计,从图 2 可以看出,1995—1999 年,钟误差较大,最大达  $80 \times 10^{-9}$  s,而从 2000 年之后,钟误差最大为  $20 \times 10^{-9}$  s,由此说明卫星钟的精度得到了极大的提高。从图 2 还可以看出,2000 年之后,除 2005、2009 年外,其他时间的钟误差均小于  $6 \times 10^{-9}$  s。

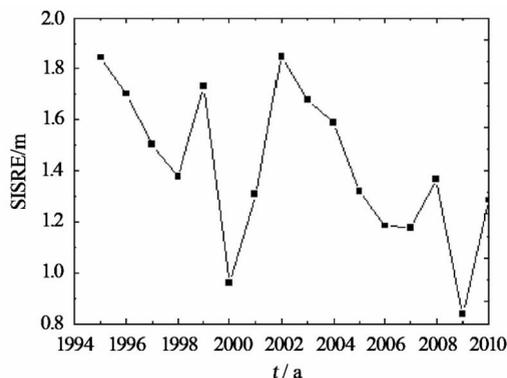


图 1 按年份统计的 SISRE

Fig.1 Yearly SISRE

表 3 分析卫星钟精度时使用的数据

Tab. 3 Data for satellite clock correction accuracy analysis

日期			计算历元		参考历元		卫星号 (PRN)				
年-月-日	GPS 周	周积日	时:分:秒	周积秒	时:分:秒	周积秒					
1995-05-23	803	2	22 :45 :00	254 700	22 :00 :00	252 000	04	05	06	09	12
1996-05-22	854	3	2 :30 :00	267 300	2 :00 :00	266 400	05	16	06	17	23
1997-05-23	906	5	4 :15 :00	447 300	4 :00 :00	446 400	17	26	23	21	09
1998-05-23	958	6	10 :00 :00	554 400	10 :00 :00	554 400	04	18	24	10	13
1999-05-23	1011	0	22 :45 :00	81 900	22 :00 :00	79 200	26	17	23	04	22
2000-05-22	1063	1	10 :30 :00	124 200	10 00 00	122 400	03	02	16	01	22
2001-05-23	1115	3	12 :15 :00	303 300	12 00 00	302 400	09	21	23	31	02
2002-05-23	1167	4	2 :00 :00	352 800	2 :00 :00	352 800	09	11	14	18	21
2003-05-23	1219	5	3 :00 :00	442 800	2 :00 :00	439 200	05	07	11	14	20
2004-05-22	1271	6	2 :45 :00	528 300	2 :00 :00	525 600	05	07	11	14	20
2005-05-23	1324	1	2 :30 :00	95 400	2 :00 :00	93 600	01	24	14	25	16
2006-05-23	1376	2	0 :15 :00	173 700	0 :00 :00	172 800	25	20	11	17	30
2007-05-23	1428	3	0 :15 :00	260 100	0 :00 :00	259 200	23	11	04	12	20
2008-05-22	1480	4	0 :15 :00	346 500	0 :00 :00	345 600	20	31	16	04	13
2009-05-23	1532	6	12 :15 :00	562 500	12 :00 :00	561 600	29	02	31	04	30
2010-05-23	1585	0	6 :15 :00	22 500	6 :00 :00	21 600	02	30	14	09	17

表 4 卫星钟差偏差和 RMS 的计算结果

Tab. 4 Calculation results of satellite clock correction bias and RMS

时间 (年)	卫星号	广播钟差 ( $10^{-6}$ s)	精密钟差 ( $10^{-6}$ s)	偏差 ( $10^{-6}$ s)	偏差统计 ( $10^{-9}$ s)
2010	2	258.146 596	258.144 632	0.001 964	RMS = 3.165
	30	245.182 222	245.176 459	0.005 763	
	14	48.728 357	48.731 266	-0.002 909	
	9	8.164 157	8.165 206	-0.001 049	
	17	152.425 558	152.423 700	0.001 858	

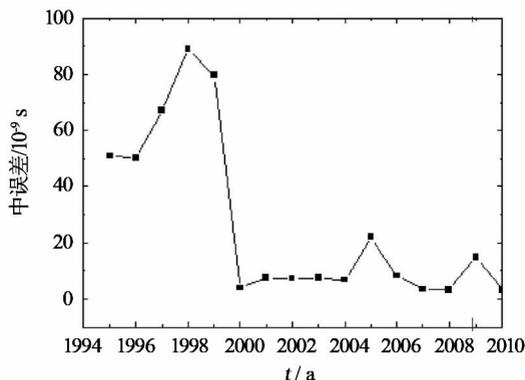


图 2 年份卫星钟差统计

Fig. 2 Yearly satellite clock error

## 4 单点定位精度统计

单点定位时只使用高度角大于  $3^\circ$  的 C/A 码伪距观测值,目的是考察标准定位服务 (SPS) 的精度。电离层折射改正采用 Klobuchar 模型,对流层折射改正采用 Saastamoinen 模型,定位时对粗差进行了剔

除。卫星位置和卫星钟差都使用广播星历计算。表 5 是所考察的时间和测站,其中的 YELL 和 CAGS 位于加拿大,都是 IGS 站点。每年只计算一个测站连续一个小时动态定位的结果。首先求出每个历元的 WGS84 三维坐标,然后计算与 ITRF 空间三维坐标差,再转换成大地坐标系在北方、东方向和高程方向的坐标差,图 3、4 是 1999、2004 年的偏差图,图 5 是历年平面位置偏差的最大值、平均值和均方根误差统计,图 6 是历年高程偏差的最大值、平均值和均方根误差统计。

表 5 单点定位数据处理汇总

Tab. 5 Summary of data of single point positioning

年份	时间		测站	DOME	采样间隔 (s)
	GPS 周	周积秒			
1995	803	172 800 — 176 370	YELL	40107M003	30
1996	854	266 400 — 269 970	YELL	40107M003	30
1997	906	439 200 — 442 770	YELL	40107M003	30
1998	958	525 600 — 529 170	YELL	40107M003	30
1999	1011	7 200 — 10 770	YELL	40107M003	30
2000	1063	93 600 — 97 170	YELL	40107M003	30
2001	1115	266 400 — 269 970	YELL	40107M003	30
2002	1167	352 800 — 356 370	YELL	40107M003	30
2003	1219	439 200 — 442 770	YELL	40107M003	30
2004	1271	525 600 — 529 170	YELL	40107M003	30
2005	1324	93 600 — 97 170	YELL	40107M003	30
2006	1376	172 800 — 176 370	YELL	40107M003	30
2007	1428	259 200 — 262 770	YELL	40107M003	30
2008	1480	345 600 — 349 170	YELL	40107M003	30
2009	1532	518 430 — 522 000	CAGS	40147M001	30
2010	1585	0 — 3 570	YELL	40107M003	30

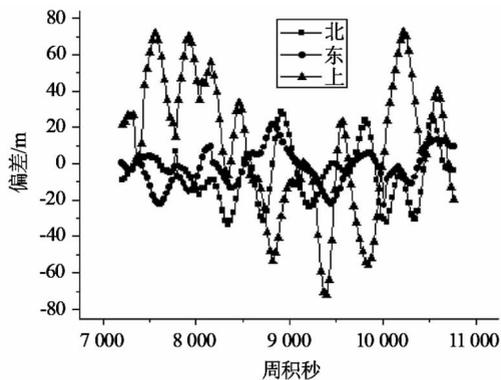


图 3 YELL 站位置偏差(GPS 周:1011)

Fig. 3 Position bias of YELL station(GPS week:1011)

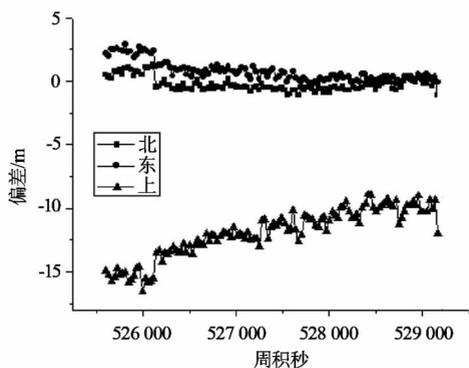


图 4 YELL 站位置偏差(GPS 周:1271)

Fig. 4 Position bias of YELL station(GPS week:1271)

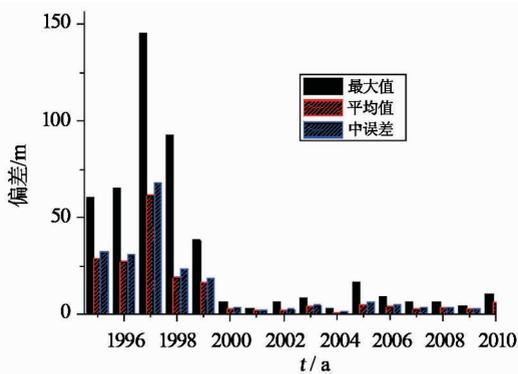


图 5 单点单历元定位水平偏差

Fig. 5 Horizontal bias of single epoch SPP

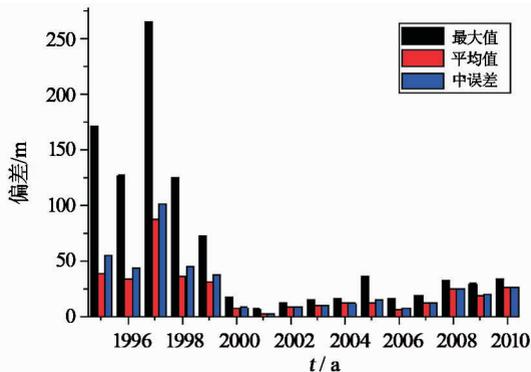


图 6 单历元单点定位高程偏差

Fig. 6 Vertical bias of single epoch SPP

从图 5 可以看出,2000 年之前,平面位置偏差很大,尤其是 1997 年,偏差最大达到 145.3 m,中误差达到 68.4 m,1995、1996、1998、1999 年的偏差也较大,平均偏差在 17.0 ~ 29.0 m,中误差在 19.0 ~ 32.0 m。而到了 2000 年之后,偏差都较小,平均偏差在 1.0 ~ 6.0 m,中误差在 1.2 ~ 6.8 m。最好的是 2004 年,最大偏差为 3.1 m,平均偏差为 1.1 m,中误差为 1.2 m。从图 6 可以看出,高程精度的情况与平面精度雷同,只不过数值更大一些,1997 年偏差最大是 265.1 m,中误差达到 101.0 m,1995、1996、1998、1999 年的偏差也较大,平均偏差在 72.0 ~ 171.0 m。而到了 2000 年之后,偏差都较小,平均偏差在 2.0 ~ 26.0 m,中误差在 2.6 ~ 26.4 m。最好的是 2001 年,最大偏差为 7.2 m,平均偏差为 2.2 m,中误差为 2.7 m。因此我们有理由相信当前 GPS 单点单历元定位的平面误差为 1.0 ~ 7.0 m,高程误差为 2.5 ~ 27.0 m。

### 5 结论

1)对 1995—2010 年预报星历误差的分析表明,SISRE 有逐渐减小的趋势,当前卫星星历的预报误差小于 2 m。

2)对 1995—2010 年预报钟差精度分析表明,钟差的精度从 2000 年之后有明显提高,这主要是美国取消了 SA 政策。当前钟差的预报误差为  $(6 \sim 20) \times 10^{-9}$  s,即 6 ~ 20 ns;

3)对 1995—2010 年单点单历元定位的误差分析表明,2000 年之后星历误差和钟差误差显著减小,而单点定位在 2000 年之后平面精度和高程精度明显提高。通过统计分析还表明,当前 GPS 单点单历元定位的平面误差为 1.0 ~ 7.0 m,高程误差为 2.5 ~ 27.0 m。

### 参 考 文 献

- 1 Warren D and Raquet J. Broadcast vs. precise GPS ephemerides;a historical perspective [J]. GPS Solutions, 2003 (7): 151 - 156.
- 2 郭裴,等. GPS 系列卫星广播星历轨道和钟的精度分析 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(5): 589 - 592. (Guo Pei, et al. Precision analysis on orbit of GPS satellites broadcast ephemeris [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(5): 589 - 592)
- 3 余鹏,孙学金,赵世军. GPS 广播星历轨道误差的探讨 [J]. 测绘通报, 2004, (4): 6 - 8. (Yu Peng, Sun Xuejin and Zhao Shijun. Approach to orbital errors of GPS broadcast ephemeris [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2004, (4): 6 - 8)

- 4 郭际明,等. GLONASS 卫星广播星历精度分析[J]. 大地测量与地球动力学,2011,(1):68-71. (Guo Jiming, et al. Accuracy analysis of GLONASS satellites broadcast ephemeris[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011, (1):68-71)
- 5 蔡昌盛,李征航,张小红. SA 取消前后 GPS 单点定位精度对比分析[J]. 测绘信息工程,2002,27(3):24-25. (Cai Changsheng, Li Zhenghang and Zhang Xiaohong. Analysis of positioning accuracy of a single GPS receiver before and after removal of SA[J]. Journal of Geomatics, 2002,27(3):24-25)
- 6 刘伟平,郝金明,王平. 标准单点定位与精密单点定位精度对比研究[J]. 测绘通报,2010,(4):5-7. (Liu Weiping, Hao Jinming and Wang Ping. Research on comparison of the precision of standard point positioning and Precise Point Positioning[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2010,(4):5-7)
- 7 Scripps orbit and permanent array center(SOPAC). IGS database [DB/OL]. <http://sopac.ucsd.edu/dataArchive/dataBrowser.html>.
- 8 McCarthy D D and Petit G. IERS conventions [R]. IERS Technical Note No.32, IERS conventions centre, Gerard Petit, France, 2004.
- 9 Center for orbit determination in Europe FTP server [EB/OL]. <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/BSWUSER50/GEN/SATELLIT.I05>.
- 10 International Earth Rotation and Reference System Service (IERS) [EB/OL]. <http://data.iers.org/products/6/14822/orig/bulletina-xxiv-018.txt>.
- 11 National Radio Astronomy Observatory [EB/OL]. <http://www.cv.nrao.edu/~rfisher/Ephemerides/times.html>
- 12 王爱生. GNSS 测量数据处理[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2010. (Wang Aisheng. GNSS surveying data processing[M]. Xuzhou:China University of Mining and Technology Press,2010)
- (上接第 75 页)
- 3 <http://data.iers.org/products/6/11634/orig/bulletina-xx-034.txt>
- 4 Wolfgang R. Dick and Bernd Richter. IERS Annual Report 2006. International Earth Rotation and Reference Systems Service, Central Bureau. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2008.
- 5 刘万科. 导航卫星自主定轨及星地联合定轨的方法研究和模拟计算[D]. 武汉大学,2008 (Liu Wanke. Research and simulation on autonomous orbit determination and combined orbit determination of navigation satellites[D]. Wuhan University,2008)
- 6 陈金平,尤政,焦文海. 基于星间距离和方向观测的导航卫星自主定轨研究[J]. 宇航学报,2005,26(1):43-46. (Chen Jinping, You Zheng and Jiao Wenhai. Research on autonav of navigation satellite constellation based on crosslink range and Inter-satellites orientation observation [J]. Journal of Astronautics,2005,26(1):43-46)
- 7 刘林,刘迎春. 关于星-星相对测量自主定轨中的亏秩问题[J]. 飞行器测控学报,2000,29(3):13-16. (Liu Lin and Liu Yinchun. Rank problem of cross-link observing Autonav[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology,2000,29(3):13-16)
- 8 帅平,曲广吉. 导航星座自主星历更新技术[J]. 宇航学报,2006,27(2):187-191. (Shuai Ping and Qu Guangji. An autonomously updated ephemeris technique for navigation constellation[J]. Journal of Astronautics,2006,27(2):187-191)
- 9 闫野,郗晓宁,任萱. 利用星间测距实现卫星网自主定位[J]. 空间科学学报,2000,20(1):54-60. (Yan Ye, Xi Xiaoning and Ren Xuan. Satellite-net autonomous positioning with relative ranging[J]. Chinese Journal of Space Science, 2000,20(1):54-60)
- 10 曾旭平. 导航卫星自主定轨研究及模拟结果[D]. 武汉大学,2004. (Zeng Xuping. Research and simulation of autonomous orbit determination for navigation satellites[D]. Wuhan:Wuhan University,2004)
- 11 张艳. 基于星间观测的星座自主导航方法研究[D]. 国防科技大学,2005. (Zhang Yan. Research on autonomous navigation of constellation based on cross-link observation [D]. Defence Science University,2005)